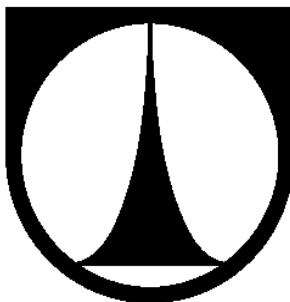


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra vozidel a motorů**



**Osobní automobil s motorem na vodík**  
**Hydrogen-Powered Passenger Vehicle**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

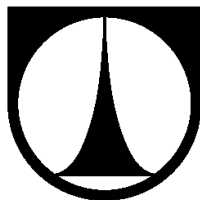
**Michal Lánský**

Leden 2014

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra vozidel a motorů



Obor 2302 R022

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

Dopravní stroje a zařízení

**Osobní automobil s motorem na vodík**

**Hydrogen-Powered Passenger Vehicle**

Bakalářská práce

KVM – BP – 217

Michal Lánský

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc. - TU v Liberci, KVM - FS

Konzultant bakalářské práce: Ing. Josef Popelka – TU v Liberci, KVM - FS

Počet stran: 37

Počet obrázků: 9

Počet tabulek: 5

Počet grafů: 1

Počet příloh: 1

Leden 2014

**Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)**

# **Osobní automobily s motorem na vodík**

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá možnostmi použití vodíku k pohonu osobních automobilů. Porovnává ekonomické a provozní parametry mezi vodíkovým zážehovým motorem a elektromotorem a palivovými články v osobním automobilu. V další části je zpracován projekt pohonu osobního automobilu Škoda Auto s vodíkovým zážehovým motorem.

Klíčová slova: vodík, zážehový vodíkový motor, elektromotor, palivový článek

## **Annotation**

This bachelor's thesis analyses the possibilities of using hydrogen as a fuel for passenger vehicles. The paper compares economic and operating parameters of the hydrogen combustion engine, electric motor and fuel cells in passenger cars. The second part describes a project of a ŠKODA passenger car powered by a hydrogen combustion engine.

Keywords: hydrogen, hydrogen combustion engine, electric motor, fuel cell

Desetinné třídění:

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno: 2014

Archivní označení zprávy:

## Prohlášení k využívání výsledků bakalářské práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., v platném znění, o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci dne 3. ledna 2013

Michal Lánský

## Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za zadání zajímavého tématu bakalářské práce a její vedení, zároveň bych chtěl také poděkovat Ing. Josefu Popelkovi za pomoc, cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat celé své rodině za její trpělivost při mém studiu na vysoké škole.

# Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2. VODÍK.....</b>	<b>13</b>
2.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku .....	13
2.2 Výskyt a formy vodíku.....	14
2.3 Výroba vodíku.....	15
2.4 Skladování vodíku.....	16
2.4.1 Tlakové nádoby .....	16
2.4.2 Kryogenní nádoby .....	16
2.4.3 Hydridy .....	17
2.4.4 Ostatní formy.....	17
2.5 Přeprava vodíku.....	17
<b>3. MOŽNOSTI VYUŽITÍ VODÍKU K POHONU OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ .....</b>	<b>19</b>
3.1 Palivový článek .....	19
3.1.1 Zjednodušený popis principu funkce palivového článku .....	19
3.1.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) .....	20
3.2 Spalovací motor.....	21
3.2.1 Nepřímá tvorba směsi.....	21
3.2.2 Nepřímá tvorba směsi CRYO.....	21
3.2.3 Přímá tvorba směsi .....	22
3.3 Kombinace „hybrid“ palivového článku a spalovacího motoru.....	23
<b>4. POROVNÁNÍ EKONOMICKÝCH A PROVOZNÍCH PARAMETRŮ OSOBNÍHO AUTOMOBILU SE ZÁŽEHOVÝM VODÍKOVÝM MOTOREM A PALIVOVÝMI ČLÁNKY .....</b>	<b>24</b>
4.1 Provozní parametry .....	24
4.1.1 Účinnost .....	24
4.1.2 Dojezd vozidel.....	27
4.2 Ekonomické parametry .....	27
4.2.1 Palivové články .....	27
4.2.2 Zážehový motor.....	27
<b>5. PROJEKT POHONU OSOBNÍHO AUTOMOBILU ŠKODA AUTO S VODÍKOVÝM ZÁŽEHOVÝM MOTOREM.....</b>	<b>28</b>
5.1 Technická data vozidla s benzinovým motorem .....	28
5.2 Úpravy motoru a vozidla pro provoz na vodík.....	30
5.2.1 Úpravy motoru pro provoz na vodík .....	30

5.2.2	Vysokotlaká nádrž na vodík .....	32
<b>6.</b>	<b>ODHAD OČEKÁVANÝCH PROVOZNÍCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>34</b>
6.1	Motor .....	34
6.2	Automobil .....	34
<b>7.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>36</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>37</b>



## Seznam použitých zkratk a symbolů

KVM TUL	Katedra vozidel a motorů Technická univerzita v Liberci
HTP	motor s vysokým kroutícím momentem
TSI	přepřínovaný motor s přímým vstřikem benzínu
EU	Evropská unie
OPEC	Organizace zemí vyvážejících ropu
ČR	Česká republika
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
NO <sub>x</sub>	oxidy dusíku
m <sub>p</sub>	hmotnost benzinové palivové nádrže s příslušenstvím [kg]
V <sub>ben</sub>	objem benzinové nádrže [l]
ρ <sub>b</sub>	hustota benzín [kg.l <sup>-1</sup> ]
m <sub>b</sub>	přibližná hmotnost benzínu v palivové nádrži [kg]
m <sub>n</sub>	celková hmotnost plné palivové nádrže včetně příslušenství [kg]
n	látkové množství [mol]
R	universální plynová konstanta [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
T	absolutní teplota [K]
p	tlak [Pa]
m <sub>H2</sub>	hmotnost vodíku v nádrži [kg]
Q <sub>H2</sub>	výhřevnost vodíku [MJ.kg <sup>-1</sup> ]
Q <sub>b</sub>	výhřevnost benzínu [MJ.kg <sup>-1</sup> ]
V <sub>b</sub>	srovnatelný odpovídající objem benzínu [l]
S <sub>LH2</sub>	dojezd na vodík [km]
S <sub>ben</sub>	dojezd na benzín [km]
V <sub>100</sub>	spotřeba benzínu na 100 km [l]

# 1. ÚVOD

Motorová vozidla se spalovacími motory výrazně přispívají k nadměrné závislosti Evropské unie na dovážených palivech, podílí se výrazně na emisích skleníkových plynů a jsou jedním z hlavních zdrojů znečištění ovzduší ve městech. Stále zpřísnující se normy pro emise z motorových vozidel a kvalitu pohonných hmot sice snižují měrné emise znečišťujících látek, ale vzhledem k rostoucí intenzitě dopravy to není dostačující.

Těžba ropy v Evropské unii v posledních letech roste, zejména díky těžbě v nových nalezištích v Severním moři. Její celková spotřeba se nemění, a to především díky náhradě ropy jako zdroje energie pro jiné než dopravní účely. V dopravě však dochází k prudkému nárůstu spotřeby ropy. V příštích dvaceti až třiceti letech je přitom očekáván pokles těžby ropy v EU v důsledku vyčerpání ložisek. Možnosti její náhrady v ostatních sektorech budou již vyčerpány a poptávka v sektoru dopravy zřejmě dále poroste. Během příštích desetiletí lze proto očekávat zvyšující se závislost na importu ropy, přičemž jedinou možností je zvýšení dodávek ropy od členů OPEC. Tento scénář je však v rozporu s politikou EU – evropská strategie pro zabezpečení zásobování energiemi má za cíl omezit závislost na ropě a snížit emise skleníkových plynů. Počítá s 20 až 23% podílem alternativních paliv v dopravě do roku 2020. Za alternativní paliva jsou přitom považována biopaliva, zemní plyn a další fosilní plyny a také vodík. Různá alternativní paliva však vyžadují různé typy a úrovně investic do infrastruktury a vybavení.

Relativně nejjednodušší je náhrada fosilních paliv biopalivy ať již ve stavu „čistém“ (100% biopaliva) nebo ve směsi s motorovými benzíny či motorovou naftou. Toto řešení vyžaduje nejen založení ploch pro produkci biopaliv a linky na výrobu biopaliv, ale také relativně vysoké investice rafinérských a distribučních společností do výstavby mísících zařízení a vytvoření ekonomických podmínek, které by zajistily, aby cena biopaliv nepřevyšovala cenu kapalných fosilních pohonných hmot. Vzhledem k relativní jednoduchosti a efektům pro zemědělství je řešení podpory biopaliv v současné době v EU stavěno na první místo. V návaznosti na to je i v ČR podpora rozvoje využívání biopaliv již do značné míry připravena k řešení v rámci jiných programů.

Zemní plyn ať stlačený nebo zkapalněný je sice běžně k dispozici, je však nezbytná nová infrastruktura pro jeho distribuci (specializované čerpací stanice) a také změna vozidel. Zavedení tohoto paliva se tedy z tohoto hlediska jeví jako náročnější než v případě biopaliv.

Palivové články poháněné vodíkem jsou pak díky značným investicím do výroby vodíku a kompletně novému systému jeho distribuce nejvíce komplikovanou alternativou. V dlouhodobém horizontu však lze očekávat přesun k vodíkovému hospodářství, což ale lze považovat za žádoucí až v době, kdy budou obnovitelné zdroje energie rozvinuté v takové míře, aby mohly z podstatné míry energeticky zajistit elektrolytické štěpení vody.

Vodík je v současnosti předmětem intenzivního výzkumu jako potenciální palivo pro motorová vozidla. Je však potřeba zdůraznit, že vodík není energickým zdrojem, ale nosičem energie. Možnosti využití vodíku v dopravě jsou v podstatě dvě:

- Spalování vodíku v klasických motorech,
- Využití vodíku v palivových článcích.

Jelikož vodík je pouze nosičem energie, je pro jeho výrobu prostřednictvím elektrolýzy nutná elektřina. Výhody užití vodíku jako paliva (bezpečnost zásobování a nulová tvorba skleníkových plynů) závisí na způsobu jeho výroby. Jestliže je vyráběn pomocí elektřiny např. vyráběné z uhlí, zvýší se sice bezpečnost zásobování, a výrazně se zvýší emise  $\text{CO}_2$ . Je-li vodík vyráběn pomocí elektřiny z nefosilných zdrojů (nukleární nebo obnovitelné), zvýší se bezpečnost zásobování a sníží emise  $\text{CO}_2$ , ale přidávají se další vlivy na životní prostředí u tohoto způsobu výroby elektřiny (uložení jaderného odpadu, omezení obnovitelných zdrojů aj.). Nevýhodou vodíku jsou tedy velmi vysoké výrobní náklady, nutnost využití principiálně odlišných vozidel, která jsou nyní teprve ve stádiu vývoje a nutnost vybudování celé infrastruktury čerpacích stanic včetně distribuce. Ačkoliv je vodík vhodnou alternativou ke klasickým benzínem nebo naftou poháněným motorům, bude zřejmě trvat ještě hodně let, než dojde k jeho plně komerčnímu využití. V současnosti jde spíše o výzkum, protože ještě není dořešena řada technických souvislostí a především použití vodíku jako paliva je zatím velmi nákladné. [1]

## 2. VODÍK

### 2.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku

Vodík je unikátní látka, jedná se o nejhojnější prvek ve známém vesmíru. Předpokládá se, že tvoří 90 % ze všech atomů (75 % hmotnosti). Na Zemi se vodík vyskytuje ve značném množství, bohužel vzhledem k jeho chemické reaktivitě převážně ve formě sloučenin. Vodík se tedy nezískává těžbou tak jako např. zemní plyn a lépe než o zdroji energie je vhodnější mluvit o jejím nosiči. Zásoby vodíku ve formě vody jsou téměř nevyčerpatelné, spalováním vodíku (oxidací) vzniká naopak vodní pára. Má nejnižší hustotu z plynů a druhý nejnižší bod varu ze všech látek (cca 20 K). Hustota energie (vztažená na jednotku hmotnosti) je však vyšší než u konvenčních pohonných hmot. [1]

Tab. 2.1: *Základní fyzikální vlastnosti vodíku* [1]

FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	Vodík (H <sub>2</sub> )	Deuterium (D <sub>2</sub> )	Tritium (T <sub>2</sub> )
Teplota tání [K]	13,957	18,730	20,620
Teplota varu [K]	20,39	23,67	25,04
Teplo tání [kJ/mol]	0,117	0,197	0,250
Výparné teplo [kJ/mol]	0,904	1,226	1,393
Kritická teplota [K]	33,19	38,35	40,60
Kritický tlak [MPa]	1,315	1,665	1,834
Disociační teplo [kJ/mol] (při 298,2 K)	435,88	443,35	446,90
Energie nulového bodu [kJ/mol]	25,90	18,50	15,10
Mezijaderná vzdálenost [pm]	74,14	74,14	74,14

Tab. 2.2: *Vlastnosti plynných automobilových paliv a cena paliv (prosinec 2013) u čerpacích stanic v ČR přepočtená na 1 kWh energie obsažené v palivu*

	Jednotka	Benzin	Vodík
Hustota kapaliny	kg/m <sup>3</sup>	745	70,7
Hustota plynu	kg/m <sup>3</sup>		0,09
Výhřevnost	kWh/ kg	11,86	33,2
Oktanové číslo VM		95	
Cena 1 kWh energie	Kč/kWh	4,15	7,50

## 2.2 Výskyt a formy vodíku

Vodík je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru. Přepokládá se, že tvoří 90 % atomů ve vesmíru a 75 % se podílí na hmotnosti vesmíru. Již z tohoto hmotnostního podílu je vidět jeho důležitost a téměř neomezený dostatek jeho zásob. Na Zemi je třetím nejrozšířenějším prvkem po kyslíku a křemíku. Asi 15,4 % atomů zemské kůry a oceánů tvoří vodík vázaný ve sloučeninách.

Vodík je hlavní složkou hvězd a zároveň jejich hlavním palivem. Hvězdy získávají svou energii díky fúzní reakci vodíkových jader za vzniku hélia.

Vodík tvoří více chemických sloučenin než ostatní prvky včetně uhlíku a sloučeniny tvoří s většinou prvků periodické tabulky.

Vodík má jednoduchou elektronovou konfiguraci, přesto se ale může vyskytovat ve více jak 40 formách. Rozmanitost vyplývá jednak z existence atomů, molekul a ionizovaných částic v plynné fázi jednak z existence tří izotopů a odpovídajících molekul a konečně z existence jaderných spinových izomerů homonukleárních dvouatomových molekul, tj. orto-divodíku, orto-dideuteria, para-dideuteria, orto-ditritia a para-ditritia.

V přírodě je vodík složen převážně z atomů tvořených protonovými jádry. Vodík na Zemi obsahuje kolem 0,0156 % atomů deuteria, které má v jádru neutron. Připojení druhého neutronu vede k nestabilitě jádra. Proto je tritium radioaktivní, emituje částice s nízkou energií a poločasem rozpadu 12,35 roku.

Vodíkový atom má velkou ionizační energii (1311 kJ/mol) - podobá se tedy více halogenům než alkalickým kovům. Odtržením elektronu dostaneme proton. Vázán na jiné částice je znám v roztocích i pevných fázích.

U všech homonukleárních dvouatomových molekul tvořených nuklidy s nenulovým spinem se předpokládá vznik jaderně spinových izomerů. Tento jev byl poprvé prokázán u divodíku, kde je zvláště nápadný. Jestliže jsou dva jaderné spiny paralelní (orto-vodík), je výsledné jaderné spinové kvantové číslo 1 a stav je třikrát degenerovaný. Jsou-li dva protonové spiny antiparalelní (para-vodík), je výsledný jaderný spin nulový a stav je nedegenerovaný. [1]

## 2.3 Výroba vodíku

Průmyslově se vodík vyrábí hlavně jednak petrochemickými procesy včetně zplyňování uhlí (90 % produkce), jednak elektrolýzou vody, navíc je významným vedlejším produktem nebo součástí plynů odcházejících z rafinerií, koksáren a elektrochemických výrob na bázi vodných roztoků anorganických kyselin nebo solí (např. solanky). Následuje přehled možných způsobů výroby vodíku:

- Reformování uhlovodíkových paliv
- Elektrolýza vody

Jedná se o proces, při němž stejnosměrný proud rozkládá vodu na kyslík a vodík. Vzhledem k tomu, že se každý plyn vyvíjí na jiné elektrodě je možné je snadno oddělit. Výchozí surovinou je pouze voda. Celková spotřeba energie při této výrobě je 5 kWh/m<sup>3</sup> vodíku při celkové účinnosti cca 18 – 28 %. Tato nízká účinnost je hlavní nevýhodou tohoto způsobu výroby vodíku.

- Tepelný rozklad vody

Chemická vazebná energie vody je tak velká, že k rozštěpení molekuly dochází teprve při teplotě 3 000 °C. Vzhledem k obtížnému dosažení této teploty je přímý tepelný rozklad vody k výrobě vodíku v současné době nepoužitelný.

- Fotokonverze
- Výroba z biomasy

Získávání vodíku z vody je samozřejmě velmi energeticky náročné. Za perspektivní postupy výroby vodíku jsou v současnosti považovány parní reformování uhlovodíků (hl.

zemního plynu), elektrolýza nebo termické štěpení vody (obojí např. s využitím elektřiny a tepla vzniklých z jaderné energie) a zplyňování (odpadní) biomasy. [1]

## **2.4 Skladování vodíku**

Vývoj bezpečného, cenově dostupného a energeticky efektivního způsobu uskladnění vodíku je klíčový pro budoucnost vodíkových technologií a palivových článků. Vodík má ze všech paliv nejmenší hustotu a nejnižší bod varu, což značně komplikuje jeho skladování. Technologie pro skladování vodíku můžeme dle stupně výzkumu a vývoje v zásadě rozdělit na konvenční a alternativní. Ke konvenčním technologiím patří především tlakové nádoby pro plyný vodík označované zkratkou CH<sub>2</sub>, příp. CGH<sub>2</sub> a kryogenní nádoby pro zkapalněný vodík. Zástupcem alternativních technologií je např. skladování vodíku v metalhydridech, komplexních hydridech, v nanostrukturách uhlíku a jako součást chemických látek. [2]

### **2.4.1 Tlakové nádoby**

Pro statické aplikace se obvykle používá ocelových bezešvých lahví z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Vyrábějí se v objemech od několika litrů až do přibližně 50 l pro běžné aplikace. V mobilních aplikacích se obvykle používá kompozitních tlakových nádob. Vyrábějí se v objemech od desítek litrů až přibližně do 300 l. Tlakové nádoby pracují s přetlakem až okolo 400 bar, v nejnovějších aplikacích potom 450 až 700 bar. Dosud současný technologický limit je 1 000 bar. V mnoha aplikacích je válcový tvar mírně deformován v závislosti na potřebách zástavby do úložného prostoru vozidla. Vnitřní povrch kompozitních lahví tvoří obvykle tenká vrstva kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu.

Chceme-li skladovat vodík ve vysokotlakých nádržích, musíme jej nejprve stlačit na požadovaný tlak. Pro stlačování vodíku se používá zejména pístových kompresorů. Energie potřebná na stlačení vodíku na 350 barů dosahuje přibližně 30 % energie v palivu. [2]

### **2.4.2 Kryogenní nádoby**

Kapalný vodík je skladován při teplotě -253 °C; s tím souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění.

Pro uskladnění se používají vícevrstvé nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 10 barů. Tyto nádoby musejí být vybaveny přetlakovým mechanismem, kterým je regulován maximální přípustný přetlak. Při skladování vodíku

v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování a tedy zvyšování tlaku uvnitř této nádoby. Aby nedošlo k destrukci nádrže, musí být přebytečný tlak regulován odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně používané nádrže dosahují ztráty od 0,5 až 3,0 % z obsahu na den. Zkapalňování vodíku je technologicky i energeticky náročný proces. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje přibližně 40 % energie v palivu. Kryogenní nádoby uchovávají vodík v kapalně fázi, jejíž teplota je bohužel velmi nízká. [2]

### **2.4.3 Hydridy**

Systémy skladování vodíku v hydridech jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Jedná se o exotermní reakci, tzn. že je při absorpci vyvíjeno teplo. Opačného děje - desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu je naopak dosaženo dodáním tepla. Sledovanými parametry u těchto systémů jsou především teplota, při které dochází k desorpci vodíku z materiálu, hmotnostní kapacita absorbátoru (případně celého systému), objemová kapacita absorbátoru a v neposlední řadě cena a složitost systému. Podskupinou hydridů jsou metalhydridy (v angl. lit. označované také jako Conventional Hydrides) a komplexní hydridy. [2]

### **2.4.4 Ostatní formy**

Ostatní možnosti skladování představují uhlíková adsorpce, skleněné mikrogranule a oxidační technologie železa.

## **2.5 Přprava vodíku**

Vodík lze přepravovat buď v přepravních nádobách anebo pomocí produktovodů. Obojí komplikují jeho vlastnosti uváděné v kapitole věnované skladování, které vedou k větší nákladnosti jeho přepravy oproti klasickým palivům.

Přprava stlačeného vodíku je vhodná pro malá množství, protože hmotnost tlakových přepravních nádob vzhledem k hmotnosti přepravovaného vodíku je velká. Kryogenní přepravní kontejnery na kapalný vodík jsou z tohoto hlediska řádově efektivnější, ale mají zase dražší provoz.

Přpravu vodíku plynovody komplikuje jeho malá hustota vyžadující používání vyšších provozních tlaků. Ve světě existuje několik dálkových plynovodů dlouhých řádově stovky kilometrů (Severní Amerika, Německo). Naproti tomu produktovody na kapalný vodík existují jen na krátkou vzdálenost.



Výzkumy naznačují, že je technicky možné po určitých úpravách k distribuci vodíku využít existující systém potrubí pro dopravu a distribuci zemního plynu. Přestože je objemová výhřevnost vodíku oproti zemnímu plynu třetinová, je možné díky jeho nižší viskozitě a hustotě přepravit pouze o 10 - 15 % méně energie ve vodíku než v zemním plynu a je potřeba jen o málo více čerpací práce.

Vodík je možné též dopravovat ve zkapalněném stavu prostřednictvím tankerů vodní dopravou nebo v cisternách po železnici. Při přepravě dochází ke ztrátám a to přibližně 0,5 % za 1 den. Při dopravě vodíku na větší vzdálenosti však dochází k podstatnému navýšení nákladů. [1]

### **3. MOŽNOSTI VYUŽITÍ VODÍKU K POHONU OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ**

Vodík je předmětem současného intenzivního výzkumu jako potenciální palivo pro motorová vozidla. Spalování vodíku v klasických motorech probíhá tak, že se vodík spaluje obdobně jako běžné pohonné hmoty. Při spalování vodíku vzniká jenom neškodná voda a malé množství oxidů dusíku.

Vodíkový pohon je z technického hlediska již dnes možný. Lze jej uskutečnit jednak pomocí upraveného tradičního spalovacího motoru anebo pomocí elektromotoru napájeného proudem přímo z vodíkových palivových článků.

Mimo kosmickou a leteckou dopravu se jako vhodnější alternativa ke spalování vodíku jeví palivové články vyrábějící přímo elektrický proud, které mají větší účinnost než spalovací motor. Vzniklou elektrickou energii lze též akumulovat a dále je možné případně rekuperovat kinetickou energii při brzdění vozidla. [1]

#### **3.1 Palivový článek**

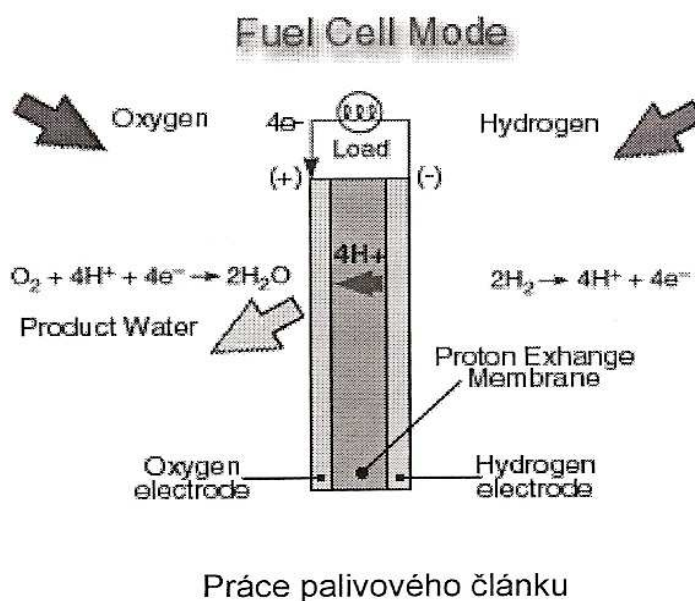
Pohonnou jednotkou ve vozidle je elektromotor a elektřina pro něj je, na rozdíl od elektromobilů poháněných akumulátory, vyráběna přímo ve vozidle v palivových článcích. Elektřina vzniká exotermní elektrochemickou reakcí samotného vodíku, nebo vodíku chemicky vyvinutého rovněž v automobilu (např. ze zemního plynu, metanolu, benzínu apod.) s kyslíkem (ze vzduchu). Kromě elektřiny vzniká také voda nebo vodní pára. Nejedná se tedy o spalování paliva, nýbrž o chemickou reakci - opak elektrolýzy. Proti klasickým akumulátorům elektromotorů mají palivové články řadu výhod, především vyšší jízdní dojezd, ekologickou čistotu a vyřazené palivové články nezatěžují životní prostředí těžkými kovy jako klasické olověné akumulátory. [1]

##### **3.1.1 Zjednodušený popis principu funkce palivového článku**

Princip palivového článku lze nejnázorněji objasnit na palivovém článku s polymerní membránou. Tento článek se skládá ze dvou elektrod, na jejichž povrchu se nachází slabá vrstva uhlíku obsahující malé množství platiny, která zde slouží jako katalyzátor. Elektrody jsou od sebe odděleny tenkou polymerní membránou, která propouští kladně nabitě ionty - protony (u katexové membrány).

Vodík je přiváděn na anodu, kde na vrstvě katalyzátoru dochází k jeho disociaci na kladné ionty (protony) a elektrony. Protony procházejí skrze polymerní vrstvu, elektrony jsou nuceny procházet externím okruhem a mohou tedy konat užitečnou práci. Na katodě pak sloučením dvou kladně nabitých vodíkových iontů (protonů), dvou elektronů a atomu kyslíku vzniká voda (vzhledem k provozní teplotě palivového článku obvykle v podobě páry). Na stranu katody je přiváděn čistý kyslík nebo častěji kyslík jako součást vzduchu. [3]

### 3.1.2 Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)



Obr. 3.1: *Popis principu funkce palivového článku* [1]

Jako elektrolyt slouží iontoměničová polymerní membrána (většinou na bázi kyselých fluorovaných polymerů), která je výborným protonovým vodičem. Vzhledem k tomu, že jedinou kapalinou v tomto typu palivového článku je voda, jsou minimalizovány problémy s korozí. Pro efektivní provoz je klíčovým problémem tzv. vodní režim. Podmínky musí být nastaveny tak, aby se voda neodpařovala rychleji, než je produkována. Vysoký stupeň hydratace membrány je podmínkou pro její dobrou protonovou vodivost. Operační teplota je limitována použitým polymerem, většinou je nižší než 120 °C (ačkoliv v současné době se provádí testy s novými materiály až k 200 °C). Palivem je v tomto případě čistý vodík nebo methanol (DMFC - Direct Methanol FC, používaný většinou v přenosných aplikacích). Jako katalyzátor se využívá především Pt, případně Pt/Rh a jiné. Pro tento typ katalyzátorů je významným jedem CO, proto se musí zajistit, aby v palivu nebyla jeho koncentrace vyšší než

5 ppm. Hustota výkonu se u PEM palivového článku pohybuje těsně nad hranicí 0,1 kW/l a 0,125 kW/kg. [3]

## **3.2 Spalovací motor**

Energie potřebná na zapálení směsi vodíku a vzduchu je nižší než u ostatních paliv. Tato energie závisí na součiniteli přebytku vzduchu. Součiniteli přebytku vzduchu je definovaný jako podíl skutečného poměru paliva a vzduchu k teoretickému poměru. Samozápaly a zpětné šlehnutí plamene do přívodního potrubí palivové směsi od válců jsou hlavním problémem vodíkových automobilů. Nežádoucí samozápaly mohou vznikat působením více zdrojů (horká místa spalovacího prostoru hlavy válce, olej, karbon a částice prachu, horký porcelán izolátoru zapalovací svíčky). [4]

### **3.2.1 Nepřímá tvorba směsi**

Nejjednodušším způsobem dodávání vodíkového paliva do motoru je prostřednictvím karburátoru nebo centrálního systému vefukování. Palivová směs je tvořena na jediném místě v sacím potrubí. Nevýhodou centrálního vefukování je větší náchylnost k předčasnému zapálení směsi.

Zdokonalením předešlého systému tvorby palivové směsi je, kdy palivová směs opět vzniká v sacím potrubí, tentokrát na více místech, před každým sacím ventilem. Tvorba směsi probíhá chvíli po začátku sacího zdvihu, aby mohl čistý vzduch ještě vytlačit spaliny a ochladil horká místa, čímž se značně omezí možnost předčasného vznícení směsi.

Pracovní tlak vefukování vodíku nepřesahuje tlak 10 barů. Tento způsob je technicky i finančně nejméně náročný, ale nese sebou řadu nevýhod. Jednou z nevýhod je objemová účinnost a následkem toho snížení výkonu oproti motorům spalující benzín se stejným obsahem. Tento systém neposkytuje takový výkon jako systém přímého vefukování vodíku do válce. [4]

### **3.2.2 Nepřímá tvorba směsi CRYO**

Vefukování podchlazeného plynu do sacího potrubí zvané cryogenic port injection. Vefukování vodíku při 3 - 6 bar (absolutního tlaku) při teplotě menší než -220 °C. V nádrži je skladován tekutý vodík (-253 °C), který je veden vakuově izolovaným potrubím až do vefukovačů v sacím potrubí. Celková teplota nasáté směsi je tedy kolem -60 °C. To má stejný

efekt jako použití chladiče vzduchu u přeplňovaných motorů. Tento systém lze použít pouze při tankování a skladování kapalného vodíku. [4]



Obr. 3.2: *Detail systému vefukování vodíku do sacího potrubí CRYO* [5]

### 3.2.3 Přímá tvorba směsi

Přímé vefukování vodíku do válce se děje po uzavření sacího ventilu v průběhu kompresního zdvihu. Tlak vefukovaného vodíku je 150 - 300 bar při teplotě -40 až 120 °C. V současné době je u tohoto systému největším problémem zajištění dodávky vysokotlakého vodíku.

Při stechiometrických podmínkách  $\lambda = 1$  představuje vodík 29,6 % objemu plyné směsi. V případě benzínu to jsou jen 2 %. Tato skutečnost vytváří limity výkonu v systémech, kde se používá vodík a výkon je o 15 % menší než v případě benzínového motoru se stejným obsahem. Tento nepříznivý jev se nazývá ztráta objemové účinnosti a může se částečně eliminovat přeplňováním motoru vodíkem nebo různými způsoby tvorby směsi. Při přímém vefukování při kompresním zdvihu pístu se částečně kompenzuje ztráta objemové účinnosti, když se vodík přidává po dobu celého kompresního zdvihu pístu, kompenzuje se úplně. Když se palivo vefukuje ještě před úplným zavřením nasávacího ventilu válce, může nastat pronikání vodíku do sacího potrubí. Při vefukování vodíku do válce může nastat nedokonalé promíchání, a tím i nedokonalé hoření a tvorba  $\text{NO}_x$ . Proto se musí řešit optimální nasměrování vefukovací trysky.

Motory s přímým vefukem vodíku do válce mohou dosahovat účinnosti 42 %, což je plně srovnatelné s nejlepšími naftovými motory. [5]



Obr. 3.3: *Detail systému přímého vefukování vodíku [5]*

### 3.3 Kombinace „hybrid“ palivového článku a spalovacího motoru

Hybridní vozidla jsou možnou alternativní technologií pro blízkou budoucnost. Zachovávají výhody benzínových (naftových) motorů a elektromobilů a zároveň potlačují jejich nevýhody. Hybridní vozidlo má dva motory (spalovací motor a elektromotor) a v závislosti na okolnostech jízdy akcelerační, nabití) využívá v dané chvíli nejvhodnější režim. Dva motory a další technická vylepšení však výrazně zvyšují cenu a také váhu vozidla. Na trhu je k dispozici již několik modelů hybridních automobilů.

Nevýhodou palivového článku je pomalá reakce na požadavek vyššího zatížení, spojená s poklesem účinnosti při přetížení. Proto se vozidla s palivovými články od počátku navrhují jako hybridní, i když při trvalém zatížení a nutnosti stálého dobíjení akumulátorů (např. dálniční provoz) vede toto uspořádání ke snížení účinnosti jak vlivem samotného článku, tak vlivem nízké účinnosti cyklu nabíjení - vybíjení. Hybrid má dále větší hmotnost a účinnost rekuperace brzdění-akcelerační bývá  $< 70 \%$ . Problémy nastávají také při teplotách pod bodem mrazu, neboť uvnitř palivového článku je vodní pára, která může zmrznout. Opětovný start je pak prakticky nemožný. [1, 4]

## 4. POROVNÁNÍ EKONOMICKÝCH A PROVOZNÍCH PARAMETRŮ OSOBNÍHO AUTOMOBILU SE ZÁŽEHOVÝM VODÍKOVÝM MOTOREM A PALIVOVÝMI ČLÁNKY

### 4.1 Provozní parametry

Zřejmou vlastností palivových článků, velmi odlišnou od spalovacích motorů, je vysoká účinnost při nízkém a její pokles s rostoucím zatížením. To na jedné straně zvýhodňuje palivové články z hlediska účinnosti u málo zatížených pohonů osobních vozidel, na druhé straně však značně zmenšuje výhody z použití hybridu. Pro dostatečnou výkonovou rezervu je zapotřebí vozidlo vybavit akumulátorem nebo jiným zdrojem záložního výkonu. Velikost článku s příslušenstvím je větší než odpovídající velikost spalovacího motoru, ale instalace do vozidla je jednodušší, neboť sloupec článků lze přizpůsobit tvarově prostoru, který je k dispozici. Vlastnosti spalovacích motorů jsou v jistém smyslu opačné než u palivových článků. Vysoké účinnosti se dosahuje až při větším zatížení, směrem k otáčkami stupňovanému výkonu účinnost opět klesá. Vysokých účinností se dosáhne při přepínání zvýšeného měrného výkonu. Takto vysoké účinnosti jsou však dosažitelné jen při vysokém kompresním poměru a rychlém hoření, charakteristickém pro vznětové motory.

#### 4.1.1 Účinnost

##### Palivový článek

**Aktivační ztráty** - způsobeny pomalou kinetikou reakce na povrchu elektrod, jsou vysoce nelineárního charakteru.

**Vnitřní proudy** - tato ztráta je způsobena nedokonalostí elektrolytu, kdy dochází k průniku paliva z anody ke katodě a dále průchodem elektronů přes membránu.

**Ohmické ztráty** - tento pokles napětí je způsoben elektrickým odporem elektrolytu, elektrod a elektrických propojení.

**Koncentrační ztráty** - způsobeny snížením koncentrace reaktantů v důsledku nedokonalého přenosu hmoty.

K dalším ztrátám v palivovém článku dochází vlivem spojování jednotlivých cel do větších celků (zvyšuje se hydrodynamický odpor toku paliva), vlivem nečistot v palivu (odfuk malé části paliva vně článku) a nutností přetlakování při vyšším proudovém zatížení.

Pokud budeme uvažovat všechny výše uvedené ztráty, dostaneme se do reálné oblasti účinnosti palivových článků, která se pohybuje od 35 % do přibližně 45 % dle konkrétní realizace a zatížení. [6]

## **Akumulátor**

Akumulátory jsou z hlediska účinnosti skladování energie velmi kvalitním akumulátorem energie. Při procesu nabíjení dochází přibližně k 10% ztrátám a podobně je tomu i při vybíjení. Dlouhodobým skladováním dochází k poklesu kapacity dle typu akumulátoru. [6]

## **Spalovací motor**

Účinnost spalovacího motoru je závislá na konstrukci motoru, ale především na podmínkách provozu (okolní podmínky, otáčky, přeplňování). Účinnost celého pohonného systému je pak dále zatížena účinností převodu mechanické práce motoru na kola vozidla a pohonem pomocných zařízení (např. generátor elektrické energie). Bez podrobnějšího přiblížení budeme uvažovat průměrnou účinnost pohonu se spalovacím motorem cca 25 – 30 % (motor, převodovka, pomocné systémy, atd.). [6]

## **Shrnutí**

Účinnost celého řetězce přeměny chemické energie paliva až na energii na kolech vozidla popisuje tzv. Well to Wheel analýza (WtW). Takto vyjádřená účinnost pohonu respektuje celý výrobní proces paliva včetně těžby, zpracování i distribuce a následně celkovou účinnost vozidla zahrnující ztráty v motoru, převodovém zařízení i všech ostatních systémech nezbytných pro provoz vozidla. Někdy bývá vyjádřena jako součin dílčích účinností, jejichž dělícím prvkem je nádrž, popř. jiný energetický koncentrátor energie. Ztráty ve výrobě a distribuci paliva popisuje Well to Tank analýza (WtT), ztráty ve vozidle pak popisuje Tank to Wheel analýza (TtW). Hodnoty pro závěrečnou zjednodušenou TtW a WtW analýzu jsou uvedeny v tabulkách 4.1 a 4.2.



Tab. 4.1: *Přehled účinnosti [%] vybraných typů pohonů [6]*

Typ pohonu	Zdroj energie	Měnič/převodovka	Motor	Celkem
Palivový článek	40 – 50	90	92	33 – 41
Bateriový	81	90	92	70
Spalovací motor	-	90	22 – 28	20 – 25

Pokud budeme posuzovat pouze účinnost koncových zařízení bez ohledu na nároky na výrobu a distribuci paliva (viz tab. 4.1), je jasným favoritem bateriový koncept vozidla následovaný konceptem využívající jako hlavní zdroj energie palivový článek. Až na posledním místě bude běžný koncept se spalovacím motorem.

Tab. 4.2: *Přehled celkové účinnosti [%] [6]*

Varianta Palivo/koncept	WtT	TtW	WtW
Vodík elektrolýza / palivový článek	17 – 20	33 – 41	6 – 8
Vodík reforming / palivový článek	43		14 – 18
Vodík termochemicky / palivový článek	30 – 33		10 – 14
Vodík elektrolýza / spalovací motor	17 – 20	20 - 25	3 – 5
Vodík reforming / spalovací motor	43		9 – 11
Vodík termochemicky / spalovací motor	30 – 33		6 – 8
El. energie / bateriový	27 – 31	66	18 – 20
Fosivní paliva / spalovací motor	84	20 – 25	18 – 21

Ze zjednodušeného rozboru WtW analýzy (viz tab. 4.2) plyne, že koncept pohonu se spalovacím motorem na fosilní paliva je ze všech představených konceptů celkově nejúčinnější, přesto že samotný koncept vozu je s účinností až na posledním místě. Druhý v pořadí je koncept bateriového vozidla, který těží z vysoké účinnosti uchování elektrické energie v akumulátorech vozidla. Na předposledním a posledním místě z hlediska účinnosti je koncept s vodíkovým článkem a spalovacím motorem na vodík.

Pro vodík je několikanásobně vyšší kapacita energie na jednotku objemu celého pohonného systému ve vozidle i nižší celková hmotnost. I přes nižší účinnost pohonu mají

vodíková vozidla v porovnání se bateriovými vozidly o stejných rozměrech vyšší dojezd. Ve skutečnosti se oba koncepty vzájemně kombinují. [6]

#### **4.1.2 Dojezd vozidel**

Dojezd u jednotlivých alternativ můžeme posoudit z tabulky 4.1. Musíme však brát v úvahu, že zde nejsou zahrnuty provozní podmínky. Při zátěži se palivovému článku účinnost snižuje oproti spalovacímu motoru. Proto jsou palivové články doplněny bateriemi. Na základě toho může palivový článek pracovat s maximální účinností. Při jízdě v zimním období můžeme u spalovacího motoru odebírat odpadní teplo, které naopak účinnost zvyšuje.

### **4.2 Ekonomické parametry**

#### **4.2.1 Palivové články**

Palivové články jsou v současnosti technologicky velmi vyspělá a bezpečná zařízení. Jejich komerčnímu rozšíření brání prozatím jejich velmi vysoká cena daná stupněm vývoje, převážně kusovou výrobou a v neposlední řadě cenou použitých materiálů. U nízkoteplotních palivových článků je to především cena flourovaných membrán a platiny. Cena palivového PEM článku je v současnosti přibližně 70 000 Kč/kW.

Životnost palivových článků je u současných produktů garantována na 5 – 20 tis. hodin. Budeme-li provozovat automobil 5 000 hodin a to 2 hodiny jízdy denně životnost palivového článku je 7 let. [11]

#### **4.2.2 Zážehový motor**

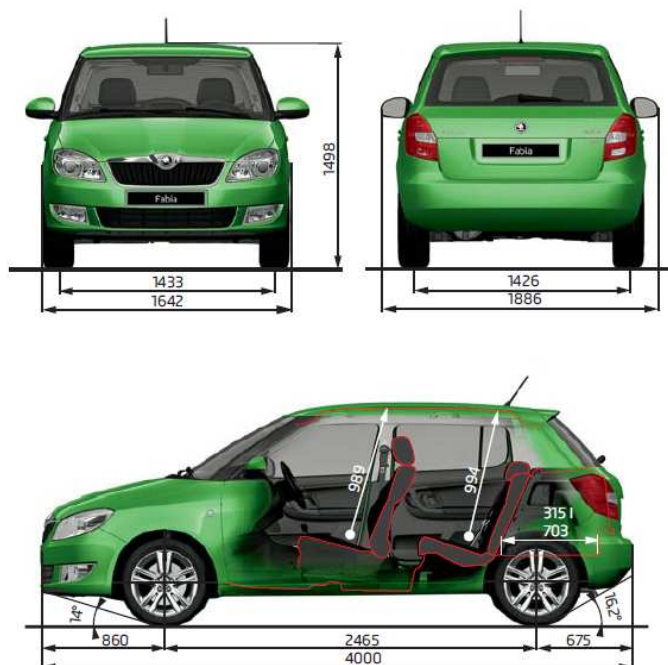
Pokud budeme uvažovat použití sériového motoru, cena závisí na výběru konstrukce daných vefukovačů a složitosti daných úprav. Nízkotlaký vefukovač pro vnější tvorbu směsi stojí okolo 5 000 Kč. Vysokotlaký vefukovač pro vnitřní tvorbu směsi stojí přibližně 90 000 Kč. Tato cena je prozatím způsobena kusovou výrobou.

## 5. PROJEKT POHONU OSOBNÍHO AUTOMOBILU ŠKODA AUTO S VODÍKOVÝM ZÁŽEHOVÝM MOTOREM

V tomto projektu jsem navázal na projekt, který byl uskutečněn a zkoušen na KVM TUL. Na základě toho jsem použil osobní automobil Škoda Fabia s čtyřválcovým přeplňovaným benzínovým motorem 1.2 TSI, který je zkonstruován k vnitřní tvorbě směsi. Výhoda přímého vefukování je možnost spalování velmi chudé směsi. Spalování chudé směsi je výhodné a to z důvodů nízké teploty plamene, což má za následek tvorbu nízkých emisí ve výfukových plynech. Pro zapálení využijeme vrstvené směsi, kde je vyšší koncentrace paliva u zapalovací svíčky.

Pro experimentální vývoj vodíkového pohonu musíme automobil upravit a přizpůsobit. Pro přímé vefukování paliva do spalovacího prostoru jsem použil nízkotlaké vefukovače se zpětnými kulovými ventily. Toto řešení jsem zvolil s ohledem na maximální využití paliva v tlakové nádrži. V tomto případě je zbytkový tlak vodíku v nádrži pouze 10 barů oproti systému s vysokotlakými vefukovači, které vyžadují pracovní tlak 100 barů.

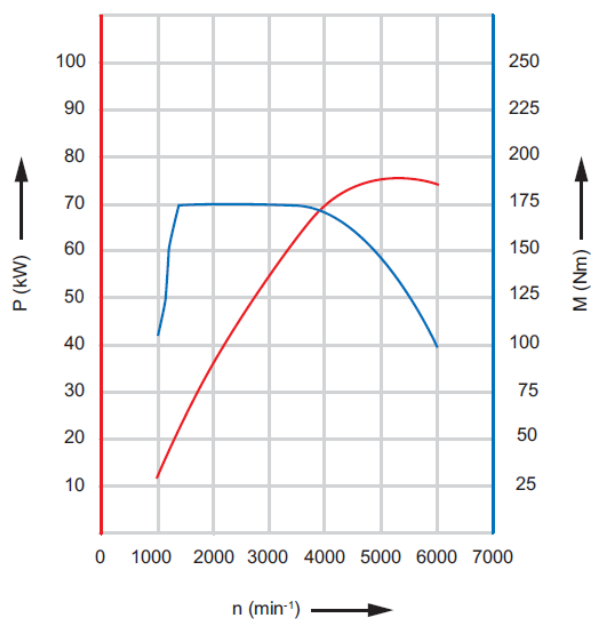
### 5.1 Technická data vozidla s benzinovým motorem



Obr. 5.1: *Parametry osobního automobilu Škoda Fabia* [10]

Tab. 5.1: *Parametry motoru Škoda Auto 1.2 TSI [10]*

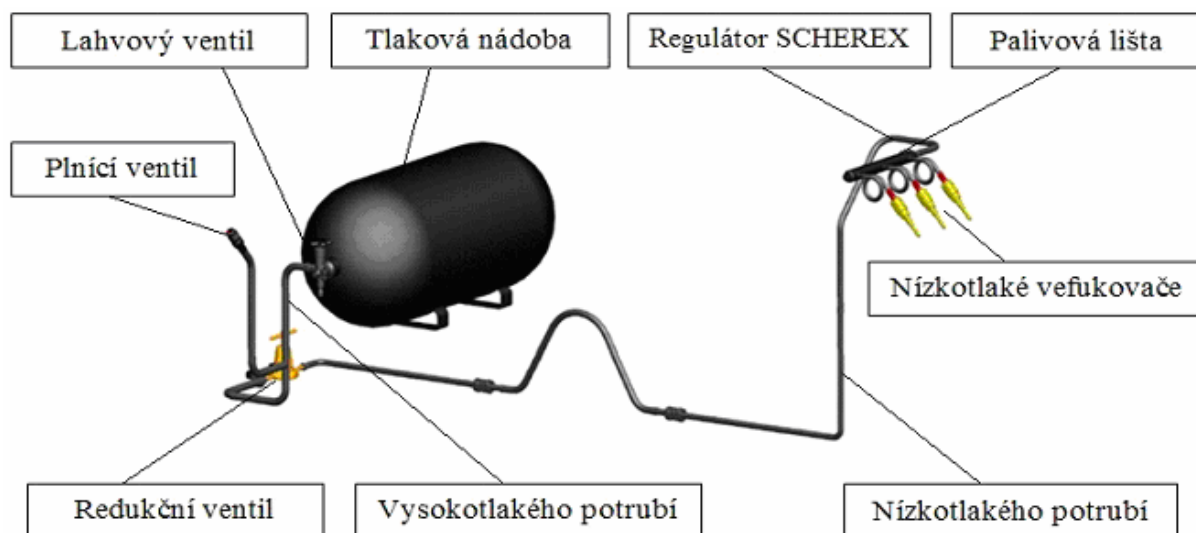
Motor	Škoda Auto 1.2 TSI
Počet válců	4
Zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1197
Maximální výkon/otáčky [kW/min <sup>-1</sup> ]	63/4800
Maximální točivý moment/otáčky [Nm/min <sup>-1</sup> ]	160/1500–3500
Vrtání [mm]	71,0
Zdvih [mm]	75,6
Kompresní poměr	10,3
Palivo	benzín, okt. č. 95/91
Objem palivové nádrže [l]	45
Spotřeba (dle normy 99/100)	
Město [l/100 km]	5,9
Mimo město [l/100 km]	4,3
Kombinovaná [l/100 km]	4,9
Celková hmotnost [kg]	1571
Pohotovostní hmotnost – základní verze vozu se 75 kg řidičem [kg]	1116



Graf 5.1: *Výkonový a momentový diagram [10]*

## 5.2 Úpravy motoru a vozidla pro provoz na vodík

Benzinová palivová soustava bude nahrazena vodíkovou palivovou soustavou (viz obr. 5.2), která je složena z palivové nádrže, lahvého uzavíracího ventilu, vysokotlakého potrubí, redukčního ventilu, nízkotlakého potrubí, nízkotlakých vefukovacích ventilů opatřených zpětnými kulovými ventily a plnicího ventilu.



Obr. 5.2: 3D model nové palivové soustavy [7]

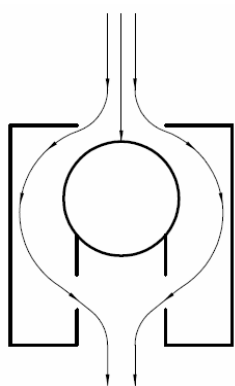
### 5.2.1 Úpravy motoru pro provoz na vodík

Zástavba tělesa vefukovačů je limitována stavebním prostorem, který je vymezen v hlavě válců a škodlivým prostorem mezi kulovým ventilem a spalovacím prostorem.

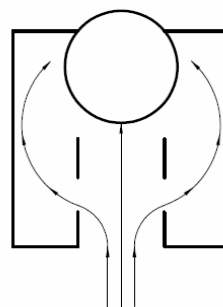
Nízkotlaké vefukovače jsou určeny pro provozní tlak 10 barů. Tato hodnota nesmí být překročena palivovým tlakem ani tlakem plynu ze spalovacího prostoru. Tlak od spalovacího prostoru musí být utěsněný zpětným kulovým uzávěrem, který byl navržený a realizovaný na KVM TUL a následně patentovaný. Jeho funkce je schematicky prezentována v obr. 5.4a a 5.4b.



Obr. 5.3: *Nízkotlaký vefukovač CAP-010 [8]*



Obr. 5.4a: *Otevřený kulový ventil [8]*



Obr. 5.4b: *Zavřený kulový ventil [8]*

Tlak paliva je řízen elektronickým regulátorem SCHEREX. Je umístěn v nízkotlakém potrubí a plní hlavní funkci regulaci tlaku. Při různých režimech zatížení dochází k rozdílnému odběru paliva, což způsobí kolísání tlaku. Toto kolísání by mělo za následek nesprávné množství vefukování paliva.

Při experimentálním vývoji vodíkového motoru na zkušebním stanovišti s dynamometrem budou v řídicí jednotce motoru optimalizována data - časování vstřiku paliva, doby otevření vstřikovacích ventilů, předstihu zážehu.

## Zapalování

Nízká iniciační energie vodíku umožňuje použití již stávajících zapalovacích systémů benzínových zážehových motorů. Při použití velmi chudých směsí, u kterých je rychlost plamene značně snížena, by jedna svíčka nemusela být dostatečná, a tak se preferuje vybavit vodíkové motory dvěma svíčkami na válec. Důležité je přesné načasování zapálení směsi

paliva vzhledem k rychlému hoření vodíku. Zapalovací svíčky pro vodíkové motory by měly mít rychlý odvod tepla ze špičky svíčky, aby nedocházelo k předčasnému zapálení paliva právě od tohoto rozžhaveného konce svíčky. Kromě toho je třeba používat materiály, které nereagují s vodíkovým palivem. Například nelze použít svíčky s platinovou špičkou, které jsou dnes běžné u zážehových benzínových motorů, protože platina funguje jako katalyzátor některých reakcí vodíku. [4]

### **Odvětrávání klikové skříně**

U vodíkových motorů je odvětrávání klikové skříně ještě důležitější než u stávajících benzínových motorů. Důvodem je stejně jako u benzínových motorů pronikání nespáleného paliva z válce přes pístní kroužky do prostoru klikové skříně. Kvůli nízké hustotě vodíku a jeho potřebné nižší iniciační energii je třeba zaručit dobré odvětrávání prostoru klikové skříně. Zapálení vodíku nahromaděného v těchto prostorách by mohlo způsobit kromě značného hluku i požár vozidla.

Kromě nespáleného paliva mohou do klikové skříně pronikat výfukové plyny. Ty u vodíkového motoru obsahují značné množství vodních par. Jejich vysrážení na stěnách skříně a jejich následné smíchání s olejovou náplní skříně může postupně zhoršovat mazací schopnost oleje. To by mělo za následek větší opotřebení součástí a jejich sníženou životnost. Abychom vysrážení vody zamezili, je opět nutné zabezpečit dobrou ventilaci klikové skříně. [4]

### **5.2.2 Vysokotlaká nádrž na vodík**

Pro projekt byla použita tlaková nádoba od výrobce DYNETEK s typovým označením V072 s následujícími parametry:

- Objem: 72 dm<sup>3</sup>
- Délka: 864 mm
- Průměr: 387 mm
- Maximálním provozní tlak: 200 barů
- Materiál: Hliníková obalená kompozitním materiálem
- Hmotnost prázdná: 31,0 kg
- Hmotnost plná: 32,1 kg

## Konstrukce rámu a upevnění nádrže

Při zástavbě nádrže jsem využil zkušeností z katedry vozidel a motorů. Vzhledem k bezpečí a konstrukčním zásadám byla nádrž umístěna v zavazadlovém prostoru. Bohužel, jistou nevýhodou zástavby tlakové nádoby v zavazadlovém prostoru je zmenšení použitelného prostoru.

Konstrukce rámu byla dodána současně s tlakovou nádobou. Nádrž je připevněna ocelovými pásy s předpětím pomocí šroubů M8. Z důvodu zvýšení součinitele smykového tření jsou mezi pásy a nádobou vloženy pryžové pásy. Při zatížení pásu v podélném směru nedojde k žádnému navýšení předpětí a to ani při příčném směru. V příčném směru dochází mezi nádrží a rámem pomocí přepětí k vytvoření třecí síly, která brání k příčnému pohybu nádrže.

## Umístění nádrže s rámem do vozidla

Rám nádrže je umístěn za zadními sedadly v zavazadlovém prostoru čtyřmi šrouby M12. V místě přichycení jsou vyztuženy ocelovými podložkami. Toto zesílení zabrání vytržení šroubů z podlahy (viz obr. 5.5).



Obr. 5.5: *Umístění tlakové nádrže ve vozidle [7]*



## 6. ODHAD OČEKÁVANÝCH PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

### 6.1 Motor

Parametry motoru lze obtížně odhadnout. Pro porovnání s benzínovým motorem bychom potřebovali znát naměřené výsledky na dynamometru, jmenovitý výkon případně charakteristiku.

### 6.2 Automobil

#### Odhad hmotnosti vozidla

Na porovnání celkové hmotnosti vozidla po odstranění benzinové nádrže a instalaci tlakové lahve jsem pro výpočet uvažoval hmotnosti jednotlivých palivových nádrží s plným obsahem.

Hmotnost benzinové palivové nádrže s příslušenstvím:  $m_p = 12 \text{ kg}$

Objem benzinové nádrže:  $V_{ben} = 45 \text{ l}$

Hustota benzínu:  $\rho_b = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$

Přibližná hmotnost benzínu v palivové nádrži:  $m_b = \rho_b \cdot V_{ben} = 31,5 \text{ kg}$  (1)

Celková hmotnost plné palivové nádrže včetně příslušenství:  $m_n = m_b + m_p = 43,5 \text{ kg}$  (2)

Hmotnost tlakové nádoby s příslušenstvím:  $41,0 \text{ kg}$

Hmotnost plné tlakové nádoby včetně příslušenství:  $42,1 \text{ kg}$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že při porovnávání jednotlivých hmotností plných nádrží je rozdíl hmotnosti vozidla zanedbatelný. Během provozu a následné spotřeby paliva je rozdíl hmotnosti vozidla větší při použití konvenčního benzínového motoru.

#### Dojezd

Maximální tlak v nádrži je 200 barů. Pro výpočet dojezdu volím 190 barů z důvodu zůstatkového tlaku, který činí 10 barů. Pro zjednodušení výpočtu jsem použil stavovou rovnici ideálního plynu (3) a její úpravou získáme vztah pro výpočet látkového množství vodíku (4).

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3)$$

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = 561,24 \text{ mol} \quad (4)$$

Vodík v plynné fázi (i stlačený) se vyskytuje jako dvouatomová molekula, tj. molekulová hmotnost:  $M_R = 2.02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

$$\text{Hmotnost vodíku v nádrži: } m_{H_2} = M_R \cdot n = 1,1337 \text{ kg} \quad (5)$$

Při výpočtu použijí přepočet přes výhřevnost na benzín:

$$\text{Výhřevnost vodíku: } Q_{H_2} = 120 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Výhřevnost benzínu: } Q_b = 43 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\text{Hustota benzínu: } \rho_b = 0,7 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$$

$$\text{Srovnatelný odpovídající objem benzínu: } V_b = \frac{Q_{H_2} \cdot m_{H_2}}{Q_b \cdot \rho_b} = 4,519 \text{ l} \quad (6)$$

Spotřebu benzínu pro daný motor volím kombinovanou 4,9 l/100.

$$V_{ben} = 45 \text{ l}$$

**Dojezd na vodík:**

$$S_{LH_2} = \frac{V_b}{V_{100}} \cdot 100 = 92 \text{ km} \quad (7)$$

**Dojezd na benzín:**

$$S_{ben} = \frac{V_{ben}}{V_{100}} \cdot 100 = 918 \text{ km} \quad (8)$$

## 7. ZÁVĚR

Na KVM TUL byl v minulých letech vyvíjen vodíkový motor s vefukováním vodíku do válců vysokotlakými vefukovacími ventily (100 barů), vycházející z původního nepřepřlňovaného benzinového motoru Škoda Auto 1.2 HTP. Během zkušebního provozu měl motor nepravidelný chod. Tento problém byl pravděpodobně způsoben nesprávnou tvorbou směsi ve válci. Bakalářská práce uvádí návrh koncepce přepřlňovaného vodíkového motoru vycházejícího z benzinového přepřlňovaného motoru Škoda Auto 1.2 TSI, který je konstruován pro přímé vstřikování benzínu.

Pro vefukování vodíku do válců jsem navrhl nízkotlaké ventily (10 barů) z důvodu maximálního využití paliva z tlakové nádoby. Vefukování se uskutečňuje během sacího zdvihu pístu. V důsledku tohoto časování vefuku může dojít k nevhodnému vrstvení směsi ve válci, což má za následek nedokonalé promíchání spalované směsi, a tím i nedokonalé hoření a nepříznivý vliv na tvorbu emisí škodlivých plynů  $\text{NO}_x$ . Tyto negativní vlivy by bylo možné částečně eliminovat vhodnou úpravou proudění vodíku ve válci úpravou tvaru spalovacího prostoru v pístu a optimálním nasměrováním vefukovací trysky. Další komponenty vodíkového palivového systému jsou uvedeny v kap. 5.2.

V současné době není použití vodíku jako automobilového paliva vhodné vzhledem k jeho výrobě, distribuci a skladování. Při výběru pohonného systému vždy nakonec rozhodují příslušné náklady. Vzhledem ke krátkému dojezdu automobilů s vodíkovým pohonem lze očekávat, že se palivo vodík uplatní zejména u vozidel v městském provozu.

Náklady na samotný vodík jako palivo jsou dnes již řádově srovnatelné s konvenčními palivy, ale náklady na pohonné systémy vozidla jsou řádově vyšší oproti konvenčním. V budoucnosti se předpokládá jejich pokles, což spolu s růstem cen klasických paliv bude podporovat rozvoj vodíkových technologií.

## Literatura:

- [1] *Grant MD ČR č. 1F44E/022/210*: Ekonomika zavádění alternativních paliv v dopravě a možnosti internalizace externích nákladů dopravy v České republice. 2006-01
- [2] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk: Hytep.cz [online]. 2007-05-17 Skladování vodíku I. Dostupné z WWW: <<http://hytep.cz/?loc=article&id=8>>.
- [3] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk: Hytep.cz [online]. 2007-06-17 Palivové články Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/cz/vodik/informace-o-vodiku/vyuziti-vodiku/497-p...>>.
- [4] FORBELSKÝ Antonín: Spalování vodíku v pístových spalovacích motorech, 2009
- [5] FICKEL, Hans-Christian. Wwww.storhy.net [online]. 2008-06-03 Future hydrogen vehicles, Expectations to Storage Systems. Dostupné z WWW: <[http://www.storhy.net/finalevent/pdf/WS1\\_Future\\_BMW-Fickel.pdf](http://www.storhy.net/finalevent/pdf/WS1_Future_BMW-Fickel.pdf)>.
- [6] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk: Hytep.cz [online]. 2007-09-10 Účinnost II. Dostupné z WWW: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=12>>.
- [7] POPELKA Josef, STARÝ Petr: Installing the SI engine, using hydrogen as fuel, into the passenger car.
- [8] POPELKA Josef: The SI engine with low-pressure direct injection of hydrogen
- [9] ŠTETINA, Josef. Wwww.vutbr.cz/elearning [online]. 2008 Pracovní cykly spalovacích motorů. Dostupné z WWW: <<https://www.vutbr.cz/elearning/mod/resource/view.php?id=81650>>.
- [10] <<https://www.skoda-auto.cz>>.
- [11] <<https://www.ballard.com>>.

## Seznam obrázků:

Obr. 3.1: Popis principu funkce palivového článku.....	20
Obr. 3.2: Detail systému vefukování vodíku do sacího potrubí CRYO.....	21
Obr. 3.3: Detail systému přímého vefukování vodíku.....	23
Obr. 5.1: Parametry osobního automobilu Škoda Fabia.....	28
Obr. 5.2: 3D model nové palivové soustavy.....	30
Obr. 5.3: Nízkotlaký vefukovač CAP-010.....	31
Obr. 5.4a: Otevřený kulový ventil.....	31
Obr. 5.4b: Zavřený kulový ventil.....	31
Obr. 5.5: Umístění tlakové nádrže ve vozidle.....	34

## Seznam tabulek:

Tab. 2.1: Základní fyzikální vlastnosti vodíku.....	13
Tab. 2.2: Vlastnosti plyných automobilových paliv a cena paliv (prosinec 2013) u čerpacích stanic v ČR přepočtená na 1 kWh energie obsažené v palivu.....	14
Tab. 4.1: Přehled účinnosti [%] vybraných typů pohonů.....	26
Tab. 4.2: Přehled celkové účinnosti [%].....	26
Tab. 5.1: Parametry motoru Škoda Auto 1.2 TSI.....	29

## Seznam grafů:

Graf 5.2: Výkonový a momentový diagram.....	29
---	----

## Seznam příloh:

CD nosič